

УДК 622.785:544.77

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-17>

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РІЗНИХ СУМІШЕЙ ГЛИНИСТИХ СУСПЕНЗІЙ

Чупринов Євген Валерійович,

кандидат технічних наук, доцент,

в.о. проректора з наукової роботи,

доцент кафедри металургійних технологій

Державного університету економіки і технологій

ORCID ID: 0000-0001-8605-3434

Проведено комплексний аналіз структурно-механічних та реологічних властивостей глинистих суспензій, що використовуються як сполучні добавки у виробництві залізорудних окатишів. Обґрунтовано недостатність традиційного оцінювання глини за параметрами набухання та колоїдності, пропонуючи натомість глибоке вивчення динамічних зсувних деформацій, в'язкості та пластичності в системі «глина – вода». Дослідження базуються на методах фізико-хімічної механіки дисперсних структур із використанням приладу Вейлера-Рейбіндера для побудови кривих залежності деформації від часу. В ході експериментів було систематизовано глини Черкаського та Даш-Салахлінського родовищ за шістьма структурно-механічними типами залежно від співвідношення швидкої еластичної, повільної еластичної та пластичної деформацій. Встановлено, що суспензії бентоніту Даш-Салахлінського родовища та четвертого шару Черкаського родовища характеризуються високою Шведовською в'язкістю, значною енергією молекулярної взаємодії та належать до четвертого типу з переважанням швидких еластичних деформацій, що свідчить про стабільність їхньої коагуляційної структури. На противагу їм, монтморилоніт другого шару утворює системи п'ятого типу з високою плинністю та низьким рівноважним модулем зсуву. Особливу увагу приділено дослідженню змішаних композицій. Доведено, що додавання глини четвертого шару до монтморилоніту суттєво підвищує енергію зчеплення частинок, тоді як введення каолініту діє як пластифікатор, знижуючи в'язкість та міцність структури. Отримані результати дозволяють оптимізувати склад сполучних добавок для забезпечення необхідної міцності сирих та сухих окатишів у металургійному виробництві, враховуючи реологічну поведінку конкретних мінеральних сумішей.

Ключові слова: металургійне виробництво, залізорудна сировина, окатиші, бентонітові глини, сполучна добавка, фізико-хімічні властивості, оптимізація, енергія зчеплення.

Chuprynov Yevhen. Research of structural and mechanical properties of various mixtures of clay suspensions

A comprehensive analysis of the structural-mechanical and rheological properties of clay suspensions used as binding additives in the production of iron ore pellets has been conducted. The inadequacy of traditional clay evaluation based on swelling and colloidal parameters is demonstrated, and instead, an in-depth study of dynamic shear deformations, viscosity, and plasticity in the "clay-water" system is proposed. The study is based on methods of physicochemical mechanics of dispersed structures using a Weiler-Rebinder apparatus to construct time-dependent deformation curves. During the experiments, clays from the Cherkasy and Dash-Salakhlinisky deposits were classified into six structural-mechanical types based on the ratio of fast elastic, slow elastic, and plastic deformations. It was established that suspensions of bentonite from the Dash-Salakhlinisky deposit and the fourth layer of the Cherkasy deposit are characterized by high Shvedov viscosity, significant molecular interaction energy, and belong to the fourth type with a predominance of fast elastic deformations, which indicates the stability of their coagulation structure. In contrast, the montmorillonite of the second layer forms fifth-type systems with high fluidity and a low equilibrium shear modulus. It has been demonstrated that adding fourth-layer clay to montmorillonite significantly increases particle bonding energy, whereas the introduction of kaolinite acts as a plasticizer, reducing the viscosity and structural strength. The results obtained allow for the optimization of the composition of binding additives to ensure the necessary strength of green and dry pellets in metallurgical production, taking into account the rheological behavior of specific mineral mixtures.

Key words: metallurgical production, iron ore raw materials, pellets, bentonite clays, binder additive, physicochemical properties, optimization, binding energy.

Вступ. Як відмічено дослідниками та промисловим досвідом багатьох підприємств [1-16], на сьогоднішній день виробники залізорудних окатишів для оцінки властивостей глинистої сполучної добавки в більшій мірі спираються на два основних параметра її характеристик – набухання та колоїдність.

Ці два параметри дають лише односторонню характеристику монтморилонітової глини як дисперсної фази в системі «глина – вода» і, при тому, вельми незначну. Оскільки ця система утворюється в поровому просторі між частинками концентрату тільки з початком процесу огрудкування і концентрація суспензії при

цьому досягає 10-30 %, стійкість такої системи в сенсі її взаємодії зі стінками частинок концентрату повинна характеризуватися динамічними зсувними деформаціями, в'язкістю і пластичністю, тобто міцністю просторової коагуляційної структури [17].

Наявність просторової структури системи визначається шляхом вимірювання механічних властивостей, і найпростіше, розвитком деформації зсуву під дією постійного напруження. За характером розвитку деформацій глини можуть бути віднесені до шести структурно-механічних типів:

$$1 - \varepsilon_0' > \varepsilon_2' > \varepsilon_1' \tau; \quad 2 - \varepsilon_2' > \varepsilon_0' > \varepsilon_1' \tau;$$

$$3 - \varepsilon_2' > \varepsilon_1' \tau > \varepsilon_0';$$

$$4 - \varepsilon_0' > \varepsilon_1' \tau > \varepsilon_2'; \quad 5 - \varepsilon_1' \tau > \varepsilon_0' > \varepsilon_2';$$

$$6 - \varepsilon_1' \tau > \varepsilon_2' > \varepsilon_0';$$

де ε_0' – відносно швидка еластична деформація у %;

ε_2' – відносно повільна еластична деформація у %;

$\varepsilon_1' \tau$ – відносна пластична деформація у %.

Зі співвідношеннями ε_0' , ε_2' і $\varepsilon_1' \tau$ пов'язані технологічні властивості суспензій. За переважним розвитком швидких деформацій (1 і 4 типи) можна судити про більшу стійкість системи. 2 і 3 типи відрізняються переважним розвитком повільних еластичних деформацій. Глинисті пасти, що відносяться до цих типів, добре формуються. Значний розвиток пластичних деформацій характерний для 5 і 6 типів, для яких коагуляційні структури глинистих суспензій нестійкі і мають велику плинність.

Таким чином, для більш повної характеристики зміцнювальної добавки була поставлена задача вивчення структурно-механічних властивостей суспензій методами фізико-хімічної механіки глинистих дисперсій. У стаціонарному стані реологічні властивості визначалися методом тангенціального зміщення пластинки, що дозволяє отримати криві «ступінь деформація – час ($\varepsilon=f(\tau)$)» при постійному навантаженні $P = \text{const}$ на приладі Вейлера-Ребіндера [18-20].

Методи та методики дослідження. Підготовка глинистих суспензій проводилася за такою методикою: наважка очищених глинистих мінералів заливалася дистильованою водою і залишалася для набухання протягом 4 годин. Після набухання система піддавалася інтенсивному перемішуванню в гомогенізаторі тривалістю 10-15 хвилин і залишалася в спокої в лабораторному екстракторі протягом 24 годин.

Після контрольної перевірки правильності підготовки досліду вибирається вага першого

навантаження шляхом короточасних навантажень зразка невеликими поступово зростаючими вантажами. Деформація відраховується за допомогою автоматичного запису кривої $\varepsilon = f(\tau)$ після закінчення 10; 20; 30; 60; 90; 120; 150; 180; 210; 240; 270 і 300 сек. Далі проводиться розвантаження з таким же порядком відліку, як і при навантаженні. Тривалість розвантаження – 100 секунд.

Результати та дискусії. За отриманими даними для всіх навантажень були побудовані криві «ступінь деформації – час ($\varepsilon=f(\tau)$)» (рис. 1-11).

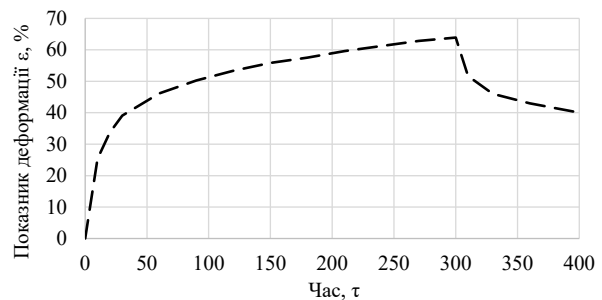


Рис. 1. Крива залежності «ступінь деформації – час ($\varepsilon=f(\tau)$)» для глини 2 шару Черкаського родовища (30 %-ва суспензія)

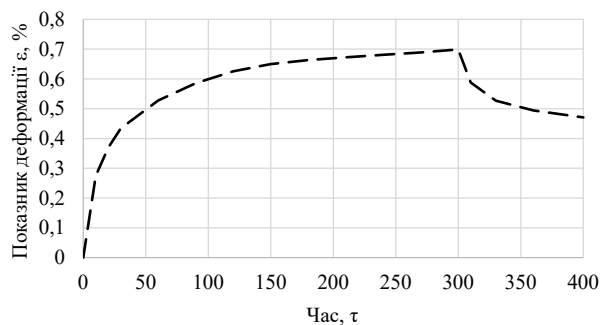


Рис. 2. Крива залежності «ступінь деформації – час ($\varepsilon=f(\tau)$)» для глини 3 шару Черкаського родовища (30 %-ва суспензія)

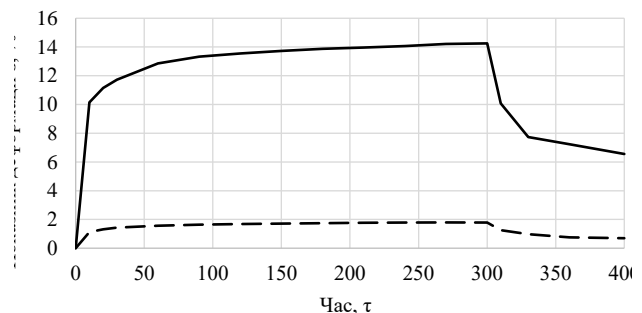


Рис. 3. Крива залежності «ступінь деформації – час ($\varepsilon=f(\tau)$)» для глини 4 шару Черкаського родовища (— — — — 20 %-ва суспензія, — — — — 30 %-ва суспензія)

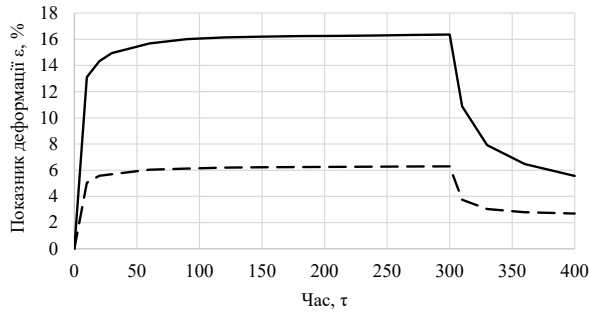


Рис. 4. Крива залежності «ступінь деформації – час ($\epsilon=f(\tau)$)» для бентоніту Даш-Салахлінського родовища (----- – 10 %-ва суспензія, --- – 20 %-ва суспензія)

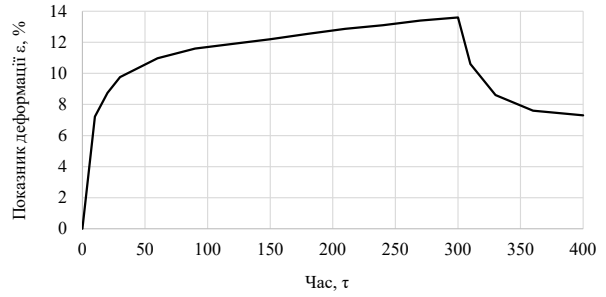


Рис. 7. Крива залежності «ступінь деформації – час ($\epsilon=f(\tau)$)» для суміші глин 4 шару (50 %) і 2 шару (50 %) Черкаського родовища, 20 %-ва суспензія

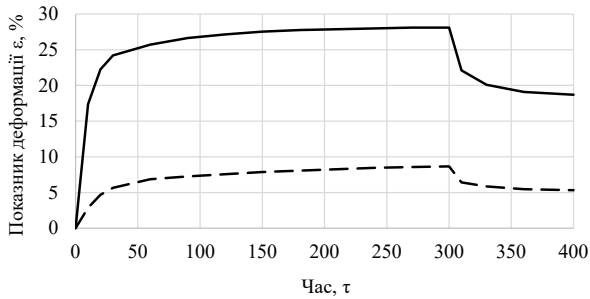


Рис. 5. Крива залежності «ступінь деформації – час ($\epsilon=f(\tau)$)» для суміші глин 4 шару (20 %) і 2 шару (80 %) Черкаського родовища (----- – 20 %-ва суспензія, --- – 30 %-ва суспензія)

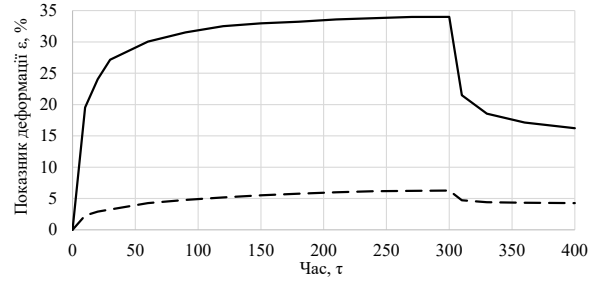


Рис. 8. Крива залежності «ступінь деформації – час ($\epsilon=f(\tau)$)» для суміші глин 2 шару (55 %), 4 шару (20 %) Черкаського родовища, каолініту (20 %) та бентоніту Даш-Салахлінського родовища (5 %) (----- – 20 %-ва суспензія, --- – 30 %-ва суспензія)

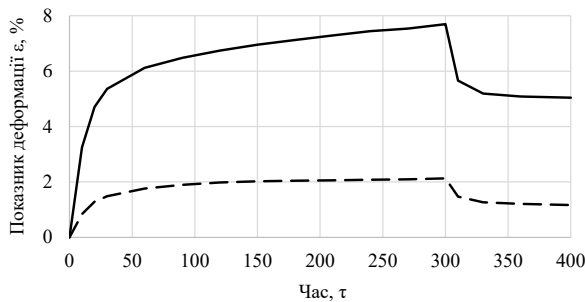


Рис. 6. Крива залежності «ступінь деформації – час ($\epsilon=f(\tau)$)» для суміші глин 4 шару Черкаського родовища (50 %) і каолініту (50 %) (----- – 20 %-ва суспензія, --- – 30 %-ва суспензія)

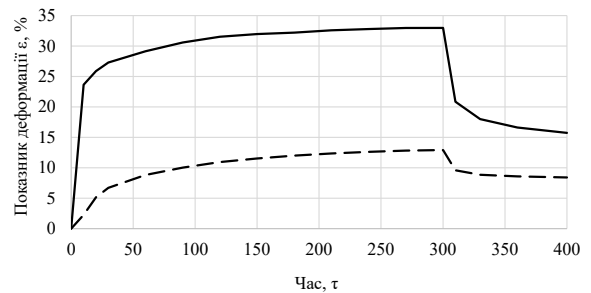


Рис. 9. Крива залежності «ступінь деформації – час ($\epsilon=f(\tau)$)» для суміші глин 2 шару (60 %), 4 шару (20 %) Черкаського родовища та каолініту (20 %) (----- – 20 %-ва суспензія, --- – 30 %-ва суспензія)

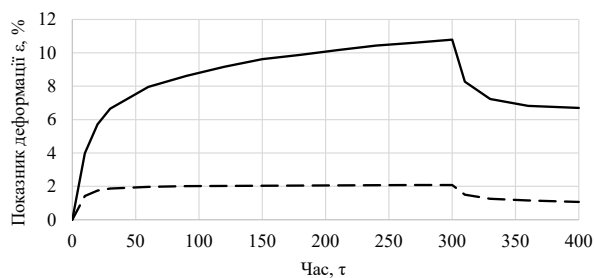


Рис. 10. Крива залежності «ступінь деформації – час ($\varepsilon=f(\tau)$)» для суміші глин 4 шару (50 %) Черкаського родовища, каолініту (45 %) та бентоніту Даш-Салахлінського родовища (5 %) (----- – 20 %-ва суспензія, ---- – 30 %-ва суспензія)

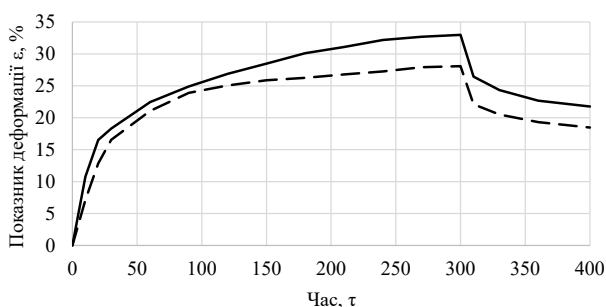


Рис. 11. Крива залежності «ступінь деформації – час ($\varepsilon=f(\tau)$)» для 65 % суміші А (3 шар (10 %) і 2 шар (90 %) Черкаського родовища), каолініту (30 %) та бентоніту Даш-Салахлінського родовища (5 %) (----- – 20 %-ва суспензія, ---- – 30 %-ва суспензія)

Структурно-механічні константи системи розраховували за відповідними формулами на основі графічної обробки кривих $\varepsilon - \tau$.

Для початку були розраховані модулі пружності зсуву (E , Па), а саме умовно миттєвий модуль пружної або швидкої деформації, умовно миттєвий модуль еластичності та рівноважний модуль.

Умовно миттєвий модуль E_1 відповідає пружній або швидкій еластичній деформації ε_0 і розвивається після накладення напруги зсуву і спадає після розвантаження зі швидкістю звуку за рівнянням

$$E_1 = \frac{P}{\varepsilon_0},$$

де P – напруга зсуву;

ε_0 – швидка еластична деформація.

P , у свою чергу, обчислювали з виразу

$$P = \frac{Fg}{S},$$

де F – навантаження в г;

S – площа рифлених пластин;

g – прискорення вільного падіння (для спрощення розрахунків приймається рівним 10 м/сек).

Умовно-миттєвий модуль E_2 (модуль еластичності) відповідає повільній еластичній деформації і обчислюється з виразу

$$E_2 = \frac{P}{\varepsilon_2},$$

де ε_2 – повільна еластична деформація (визначається на підставі досліду).

Рівноважний модуль E відповідає повному розвитку деформації системи і обчислюється на підставі даних E_1 і E_2 як

$$E_3 = \frac{(E_1 \cdot E_2)}{(E_1 + E_2)}.$$

Умовну статистичну межу плинності (P_{K1}) визначали за допомогою прямої $(d\varepsilon/d\tau) = f(P)$, що відсікає на осі P відрізок, рівний P_{K1} . $(d\varepsilon/d\tau)$ визначали як тангенс кута нахилу між віссю τ (час) і дотичною, проведеною до будь-якої точки на кривій $\varepsilon = f(P)$, після повного розвитку швидкої і повільної еластичних деформацій.

Найбільшу пластичну в'язкість (Шведовську) визначали з виразу

$$\eta = \frac{(P - P_{K1})}{(d\varepsilon/d\tau)},$$

при значенні $d\varepsilon/d\tau = 1$, де P – діюче напруження зсуву при $d\varepsilon/d\tau = 1$.

Крім зазначених констант, були розраховані деякі константи, безпосередньо пов'язані з технологічними властивостями суспензій.

Повільна еластичність λ (безрозмірна величина) була розрахована за формулою

$$\lambda = \frac{E}{(E_1 + E_2)}.$$

Також розрахована пластичність P_{K1}/η для неруйнованих структур глинистих суспензій і період релаксації – час, протягом якого пружна напруга спадає на певну величину при постійності спочатку заданої деформації, тобто час поступового розсмоктування пружної енергії, запасеної в деформованому тілі шляхом переходу її в тепло. Період релаксації визначається як відношення Шведовської в'язкості до модуля пружності системи, тобто

$$Q = \frac{\eta}{E}.$$

Для характеристики величини молекулярних сил зчеплення між частинками глинистих мінералів у коагуляційній структурі розраховувався умовний модуль деформації Es_{ym} , кДж/м³. Крім того, обчислювалися відносні деформації

$$\varepsilon'_0 = \frac{P}{E_1} \text{ (швидка),}$$

$$\varepsilon'_2 = \frac{P}{E_2} \text{ (повільна),}$$

$$\varepsilon'_1 \tau = \frac{(P - P_{K1}) \cdot \tau}{\eta} \text{ (еластична і пластична)}$$

за час ~ 1000 сек. За цей час встигають повністю розвинути всі види деформацій. За характером розвитку відносних деформацій визначався тип коагуляційної структури.

Результати розрахунків згідно наведених формул зведені в таблиці 1. З неї випливає, що 20 % суспензія II шару утворює нестійку систему, яка розшаровується менш ніж через 24 години. Суспензії з бентоніту Даш-Салахлінського родовища утворюють дуже в'язкі пасти з високою межею плинності (402 Па), великою енергією взаємодії між частинками (24,39 кДж/м³) і відносяться до 4 структурно-механічного типу, з переважанням швидких еластичних деформацій. До 4 типу відносяться також 20 % суспензій з IV шаром, яка, як і суспензія з бентонітом Даш-Салахлінського родовища, має високу Шведовську в'язкість, високу межу плинності, велику енергію взаємодії між частинками (9,9 кДж/м³). Дещо нижчі значення структурно-механічних характеристик у суспензії з палигорскітом третього шару.

Це пояснюється тим, що зі збільшенням концентрації суспензії палигорскіту швидка еластична деформація збільшується і знижується пластична, а при концентрації вище 19 % система з 4 переходить у 5 структурно-механічний тип. 30 % суспензія монтморилоніту 2-го шару відноситься до 5 структурно-механічного типу, для якого характерна велика плинність.

На відміну від суспензій з глинами третього і четвертого шарів і Са-монтморилонітом родовища Даш-Салахлін для суспензії з монтморилонітом 2 шару характерні дуже низькі показники в'язкості (Шведовської) та рівноважного модуля зсуву, але високі значення статичної пластичності, що ймовірно пов'язано зі слабким зчепленням частинок одна з одною ($E\varepsilon_{ym} = 0,143$ кДж/м³).

Вивчення структурно-механічних і реологічних сумішей глин різних шарів показало, що додавання до 20 % глини четвертого шару до монтморилоніту значно покращує властивості останнього, збільшує енергію зчеплення між частинками в суспензії до 1,38 кДж/м³. Застосування каолініту в глинистих композиціях відіграє роль пластифікатора, робить суспензію більш рухливою, пластичною і відповідно менш в'язкою. Додавання 50 % каолініту до глини

четвертого шару призводить до різкого зниження в'язкості системи (з 21300 до 4500 кПа·с для 30 % суспензії), зниження міцності структури, збільшення пластичності і зниження енергії зчеплення між частинками суспензії.

Досліди показали, що застосування невеликої кількості (до 5 %) по відношенню до інших глинистих мінералів монтморилоніту ДС в глинистих композиціях мало впливає на властивості суспензій.

Висновки. На основі проведених досліджень встановлено, що традиційні показники набухання та колоїдності не дають вичерпної оцінки технологічної придатності глинистих добавок для виробництва залізородних окатишів. Визначення структурно-механічного типу суспензій за співвідношенням швидких еластичних, повільних еластичних та пластичних деформацій дозволяє глибше прогнозувати стабільність коагуляційної структури в системі «глина – вода». Зокрема, доведено, що найбільш стійкі системи з високою енергією молекулярної взаємодії та значною Шведовською в'язкістю утворюють бентоніти Даш-Салахлінського родовища та четвертого шару Черкаського родовища, які належать до четвертого структурно-механічного типу.

Експериментально підтверджено суттєвий вплив мінерального складу та концентрації суспензій на їхні реологічні константи. З'ясовано, що монтморилоніт другого шару Черкаського родовища характеризується низьким рівноважним модулем зсуву та високою плинністю, що відносить його до менш стабільного п'ятого типу. Водночас палигорскітові глини третього шару при підвищенні концентрації понад 19 % демонструють перехід між структурними типами, що супроводжується зростанням швидких еластичних деформацій та зниженням пластичності, прямо впливаючи на зміцнювальні властивості зв'язуючого матеріалу.

Результати вивчення змішаних глинистих композицій відкривають можливості для цілеспрямованого регулювання властивостей сполучених добавок шляхом їхнього комбінування. Встановлено, що додавання до 20 % високоактивної глини четвертого шару до монтморилоніту значно інтенсифікує процеси зчеплення частинок, тоді як введення каолініту виконує роль ефективного пластифікатора, знижуючи в'язкість та міцність структури для досягнення необхідної рухливості системи. Отримані дані щодо періодів релаксації та умовних меж плинності є науковим підґрунтям для оптимізації процесів огрудкування залізородної шихти в промислових умовах.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Villanueva A., Hoff S., Michailovski A. Basf novel iron ore binder technology: study of bentonite modification. *5^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minérios*. Editora Blucher, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5151/2594-357x-30407>.
2. Forsmo S. P. E., Apelqvist A. J., Björkman B. M. T. et al. Binding mechanisms in wet iron ore green pellets with a bentonite binder. *Powder Technology*. 2006. Vol. 169, No. 3. P. 147–158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2006.08.008>.
3. Forsmo S. P. E., Vuori J. P. The determination of porosity in iron ore green pellets by packing in silica sand. *Powder Technology*. 2005. Vol. 159, No. 2. P. 71–77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.05.032>.
4. Kawatra S. K., Ripke S. J. Effects of bentonite fiber formation in iron ore pelletization. *International Journal of Mineral Processing*. 2002. Vol. 65, No. 3-4. P. 141–149. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0301-7516\(01\)00062-x](https://doi.org/10.1016/s0301-7516(01)00062-x).
5. Ripke S. J., Kawatra S. K. Bentonite binder effective strength (BEST) test for unfired iron ore pellets. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2004. Vol. 21, No. 2. P. 65–70. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf03403305>.
6. Desai R. R., Desa E. J. A., Aswal V. K. Hydration studies of Bentonite clay. *SOLID STATE PHYSICS: Proceedings of the 56th DAE Solid State Physics Symposium 2011*. AIP, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4709948>.
7. Bährle-Rapp M. Montmorillonite. *Springer Lexikon Kosmetik und Körperpflege*. Springer Berlin Heidelberg, 2007. P. 360. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-71095-0_6695.
8. Bentonite and bentonite suspensions. *Bentonite Handbook*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2017. P. 9–20. DOI: <https://doi.org/10.1002/9783433606520.ch2>.
9. Tugrul N., Derun E. M., Piskin M. Effects of calcium hydroxide and calcium chloride addition to bentonite in iron ore pelletization. *Waste Management & Research*. 2006. Vol. 24, No. 5. P. 446–455. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242x06066119>.
10. Koroğlu M. Use of calcined colemanite and bentonite as binders in the pelletizing of Hasan Çelebi iron ore : M.Sc. Thesis / Middle East Technical University. Ankara, Turkey, 1980.
11. Carmignano O. R. D. R., Carvalho C. d. F. Comparison between bentonite and serpentinite in the production process of iron ore pellets. *Rem: Revista Escola de Minas*. 2014. Vol. 67, No. 1. P. 47–53. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0370-44672014000100007>.
12. Zhu D., Pan J., Lu L. et al. Iron ore pelletization. *Iron Ore*. Elsevier, 2015. P. 435–473. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-1-78242-156-6.00015-0>.
13. Wong G., Fan X., Gan M. et al. Improvement on the thermal cracking performance of pellets prepared from ultrafine iron ore. *Powder Technology*. 2019. Vol. 342. P. 873–879. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.08.090>.
14. Kopyrin I. A., Graur I. F., Ryabokon' F. A. et al. Mechanical strength of iron-ore pellets. *Metallurgist*. 1975. Vol. 19, No. 3. P. 156–159. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf00740333>.
15. Tavares L. M., de Almeida R. F. Breakage of green iron ore pellets. *Powder Technology*. 2020. Vol. 366. P. 497–507. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.02.074>.
16. Moraes S. L. d., Lima J. R. B. d., Ribeiro T. R. Iron Ore Pelletizing Process: An Overview. *Iron Ores and Iron Oxide Materials*. InTech, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.73164>.
17. Wan W., Ge L. Research and application of high-performance water-based drilling fluid in Changning shale gas block. *Drill. Prod. Technol*. 2019. Vol. 42. P. 83–86.
18. Huang X., Shen H., Sun J. et al. Nanoscale Laponite as a Potential Shale Inhibitor in Water-Based Drilling Fluid for Stabilization of Wellbore Stability and Mechanism Study. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2018. Vol. 10, No. 39. P. 33252–33259. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.8b11419>.
19. Zhong H., Huang W., Lin Y. et al. Performance evaluation of new polyamine shale inhibitor. *Pet. Drill. Technol*. 2011. Vol. 06. P. 48–52.

REFERENCES:

1. Villanueva, A., Hoff, S., & Michailovski, A. (2017). BASF NOVEL IRON ORE BINDER TECHNOLOGY: STUDY OF BENTONITE MODIFICATION. *Y 5^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minérios*. Editora Blucher. <https://doi.org/10.5151/2594-357x-30407>
2. Forsmo, S. P. E., Apelqvist, A. J., Björkman, B. M. T., & Samskog, P. O. (2006). Binding mechanisms in wet iron ore green pellets with a bentonite binder. *Powder Technology*, 169(3), 147–158. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2006.08.008>
3. Forsmo, S. P. E., & Vuori, J. P. (2005). The determination of porosity in iron ore green pellets by packing in silica sand. *Powder Technology*, 159(2), 71–77. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.05.032>

4. Kawatra, S. K., & Ripke, S. J. (2002). Effects of bentonite fiber formation in iron ore pelletization. *International Journal of Mineral Processing*, 65(3-4), 141–149. [https://doi.org/10.1016/s0301-7516\(01\)00062-x](https://doi.org/10.1016/s0301-7516(01)00062-x)
5. Ripke, S. J., & Kawatra, S. K. (2004). Bentonite binder effective strength (BEST) test for unfired iron ore pellets. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 21(2), 65–70. <https://doi.org/10.1007/bf03403305>
6. Desai, R. R., Erwin Desa, J. A., & Aswal, V. K. (2012). Hydration studies of Bentonite clay. *Y SOLID STATE PHYSICS: Proceedings of the 56th DAE Solid State Physics Symposium 2011*. AIP. <https://doi.org/10.1063/1.4709948>
7. Bährle-Rapp, M. (2007). Montmorillonite. *Springer Lexikon Kosmetik und Körperpflege* (p. 360). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-71095-0_6695
8. Bentonite and bentonite suspensions. (2017). *Bentonite Handbook* (c. 9–20). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. <https://doi.org/10.1002/9783433606520.ch2>
9. Tugrul, N., Derun, E. M., & Piskin, M. (2006). Effects of calcium hydroxide and calcium chloride addition to bentonite in iron ore pelletization. *Waste Management & Research*, 24(5), 446–455. <https://doi.org/10.1177/0734242x06066119>
10. Koroğlu, M. (1980). Use of calcined colemanite and bentonite as binders in the pelletizing of Hasan Çelebi iron ore. *M.Sc. Thesis, Middle East Technical University*. Ankara, Turkey.
11. Carmignano, O. R. D. R., & Carvalho, C. d. F. (2014). Comparison between bentonite and serpentinite in the production process of iron ore pellets. *Rem: Revista Escola de Minas*, 67(1), 47–53. <https://doi.org/10.1590/s0370-44672014000100007>
12. Zhu, D., Pan, J., Lu, L., & Holmes, R. J. (2015). Iron ore pelletization. *Iron Ore* (p. 435–473). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-1-78242-156-6.00015-0>
13. Wong, G., Fan, X., Gan, M., Ji, Z., Chen, X., Tian, Z., & Wang, Z. (2019). Improvement on the thermal cracking performance of pellets prepared from ultrafine iron ore. *Powder Technology*, 342, 873–879. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.08.090>
14. Kopyrin, I. A., Graur, I. F., Ryabokon', F. A., & Solov'ev, N. M. (1975). Mechanical strength of iron-ore pellets. *Metallurgist*, 19(3), 156–159. <https://doi.org/10.1007/bf00740333>
15. Tavares, L. M., & de Almeida, R. F. (2020). Breakage of green iron ore pellets. *Powder Technology*, 366, 497–507. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.02.074>
16. Moraes, S. L. d., Lima, J. R. B. d., & Ribeiro, T. R. (2018). Iron Ore Pelletizing Process: An Overview. *Iron Ores and Iron Oxide Materials*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.73164>
17. Wan, W., Ge, L. (2019). Research and application of high-performance water-based drilling fluid in Changning shale gas block. *Drill. Prod. Technol*, 42, 83-86.
18. Huang, X., Shen, H., Sun, J., Lv, K., Liu, J., Dong, X., & Luo, S. (2018). Nanoscale Laponite as a Potential Shale Inhibitor in Water-Based Drilling Fluid for Stabilization of Wellbore Stability and Mechanism Study. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10(39), 33252–33259. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b11419>
19. Zhong, H., Huang, W., Lin, Y., Qiu, Z., Liu, G., Zhang, G. (2011). Performance evaluation of new polyamine shale inhibitor. *Pet. Drill. Technol*, 06, 48-52.

Дата першого надходження статті до видання: 03.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0